

傅里叶变换光谱成像仪光谱传递函数研究*

相里斌^{1)†} 袁 艳²⁾ 吕群波¹⁾

1) 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

2) 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

(2008 年 1 月 22 日收到, 2008 年 12 月 12 日收到修改稿)

根据光学传递函数理论, 定义了光谱成像仪的光谱传递函数. 针对基于 Michelson 干涉仪的时间调制傅里叶变换(FT)光谱成像仪, 基于 Sagnac 干涉仪、Fresnel 干涉仪、Lloyd 干涉仪的空间调制 FT 光谱成像仪, 推导出相应的光谱调制传递函数和光谱相位传递函数解析表达式, 并分析了其物理意义. 光谱传递函数为评价相应光谱成像仪在光谱域的性能提供了一种量化的判据. 与空间域的光学传递函数相结合, 成为反映光谱成像仪综合性能的客观依据.

关键词: 傅里叶变换, 光谱成像仪, 光谱传递函数

PACC: 4230L, 4230K, 0765

1. 引 言

光谱成像技术出现于 20 世纪 80 年代, 能够感知目标在空间域和光谱域信息, 通常使用的光谱成像仪可以得到目标的两维空间与一维光谱数据, 形成三维数据立方体(data cube). 由于其卓越的信息获取能力, 二十多年来得到了飞速的发展, 在航天航空遥感、工业、农业、生物医药、天文探测、大气探测、环境与灾害监测以及军事领域都得到了十分广泛的应用, 成为光学探测技术的又一个强有力的手段.

首先进入应用的是色散型光谱成像仪, 包括棱镜分光 and 光栅分光等形式. 基于棱镜分光的典型仪器有美国海军实验室研制的高光谱数字图像收集仪 HYDICE^[1] 和欧空局的机载光谱成像仪 APEX^[2] 等; 基于光栅分光的典型仪器有美国的机载可见光/红外成像光谱仪 AVIRIS^[3], 美国国家航空和航天管理局(NASA) 的星载高光谱成像仪 Hyperion^[4], 海军地球测绘观测者卫星上搭载的海岸海洋成像光谱仪 COIS^[5], 美国 NASA 的中分辨率成像光谱仪 MODIS^[6], 欧空局的中分辨率成像光谱仪 MERIS^[7], PROBA 卫星搭载的紧凑型高分辨率成像光谱仪 CHRIS^[8] 等.

随着技术的发展和应用需求的推动, 傅里叶变

换(FT)光谱成像技术逐渐引起人们的关注, 典型的有美国 NASA 研制的时间调制型地球同步成像 FT 光谱仪 GIFTS^[9], 美国“强力卫星”搭载的空间调制型 FT 高光谱成像仪 FTHSF^[10], 高灵敏度大孔径静态光谱成像仪 LASIS^[11], 高通量成像 FT 光谱仪 HEIFTS^[12] 等.

在国内, 空间调制 FT 光谱成像仪已进入航天工程研制和应用阶段; “嫦娥一号”卫星和“环境一号”卫星都搭载了这种探测设备. 但是, 随着研究工作的不断深入, 我们发现对光谱成像仪的客观评价方法还不完善, 只在空间域有光学传递函数这样的客观评价指标, 而在光谱域却没有.

由于光谱成像仪兼具光谱探测与成像探测两种功能, 其传递函数应该包括空间域的光学传递函数与光谱域的光谱传递函数(spectral transfer function). 事实上, 早在 1965 年就有学者对光栅光谱仪的光谱传递函数进行了初步研究^[13], 1997 年美国 NASA 的学者又采用光谱调制传递函数(spectral modulation transfer function)的概念对空间调制型数字阵列扫描光谱成像仪 DASI 的性能进行了研究^[14]. 由于分光原理不同, 各种光谱成像仪的光谱传递函数也不同, 迄今为止, 还没有看到对光谱传递函数进行系统研究的报道.

本文基于光学传递函数的理论方法和思路, 定

* 国家自然科学基金(批准号: 60678038)资助的课题.

† E-mail: xiangli@opt.cn

义了光谱传递函数,针对常见的 FT 光谱成像仪,推导出相应的光谱调制传递函数与光谱相位传递函数(spectral phase transfer function)解析表达式,分析了其对仪器入射狭缝宽度和光谱分辨率等有关参数的要求.

2. 光谱传递函数定义

对光谱成像仪而言,系统的传递函数包括空间域的光学传递函数和光谱域的光谱传递函数.空间域的光学传递函数与几何成像仪相同,在光谱域,仪器的脉冲响应函数是指当输入光为单色光时系统的光谱响应函数(spectral response function),而光谱传递函数就是光谱响应函数的频谱函数.光谱传递函数是一维函数,即

$$S(\nu) = |S(\nu)| \exp[i\theta(\nu)], \quad (1)$$

其中 $|S(\nu)|$ 光谱传递函数的模,称为光谱调制传递函数, $\theta(\nu)$ 是光谱传递函数的幅角,称为光谱相位传递函数.

分析光谱传递函数的关键是考察光谱成像仪对单色输入的响应,对于色散型光谱成像仪,其输出响应是波长域的,因此这种响应函数的 FT 就是其光谱传递函数.而对于 FT 光谱成像仪,其输出信号本身就是输入信号的频域响应,因而可直接得到仪器的光谱传递函数.

由于不同光谱成像系统具有不同的分光原理,所以它们的光谱传递函数往往是不同的.限于篇幅,本文重点研究 FT 光谱成像仪的光谱传递函数.

3. 光谱传递函数计算

3.1. 时间调制 FT 光谱成像仪的光谱传递函数

考虑图 1 所示的基于 Michelson 干涉仪的时间调制 FT 光谱成像仪,当以单色光 $B(\nu)$ 入射时,理论上仪器输出的干涉信号强度为

$$K(x) = T(x)B(\nu)\exp(-i2\pi\nu x), \quad (2)$$

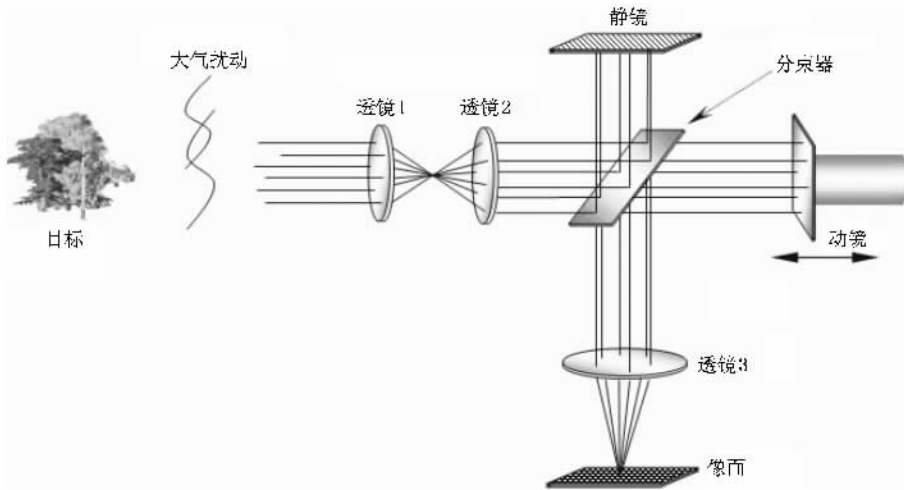


图 1 时间调制 FT 光谱成像仪原理示意图

其中

$$K(x) = \begin{cases} 1 & (|x| \leq L) \\ 0 & (|x| > L) \end{cases}$$

为截断函数, L 为最大光程差. 因此

$$K(x) = \begin{cases} B(\nu)\exp(-i2\pi\nu x) & (|x| \leq L), \\ 0 & (|x| > L). \end{cases} \quad (3)$$

显然,在 $|x| \leq L$ 范围内,光谱调制传递函数和光谱相位传递函数分别为

$$F_{\text{SMT}}(\nu) = 1, \quad (4a)$$

$$F_{\text{SPT}}(\nu) = -2\pi\nu x. \quad (4b)$$

对实际系统而言,干涉图不是以 δ 函数采样,探测器像元也不是无限小,下面分析这些因素的影响.

3.1.1. 探测器像元尺寸对光谱传递函数的影响

设探测器像元尺寸为 s , 成像镜焦距为 f , 对应单色光 $B(\nu)$ 的干涉信号强度为^[15]

$$K(x) = T(x)B(\nu)\text{sinc}(\Omega\nu x/2\pi) \times \exp[-i2\pi\nu x(1 - \Omega/4\pi)], \quad (5)$$

式中 $\text{sinc}(x) = \frac{\sin \pi x}{x}$ ， Ω 是探测器像元所张立体角， $\Omega = (s/f)^2$ 。此时，光谱调制传递函数和光谱相位传递函数分别为

$$F_{\text{SMT}}(\nu) = \text{sinc}(\Omega \nu x / 2\pi), \quad (6a)$$

$$F_{\text{SPT}}(\nu) = -2\pi \nu x (1 - \Omega / 4\pi). \quad (6b)$$

(6b) 式中光谱相位传递函数意味着光谱向小波数方向展宽，即入射单色光谱线位置由 ν 变化为 $\nu(1 - \Omega / 2\pi)$ 至 ν 一段，其均值为 $\nu(1 - \Omega / 4\pi)$ 。

由于光谱展宽为 $\delta\nu = \nu\Omega / 2\pi$ ，因光谱分辨率 $R = \nu / \delta\nu$ ，则有 $R\Omega = 2\pi$ 。由于探测器像元尺寸与成像镜焦距的影响，仪器最大光谱分辨率应满足

$$R \leq 2\pi / \Omega. \quad (7)$$

另一方面，根据采样定理，最大光程差 $L = 1 / (2\delta\nu)$ ，代入 (6a) 式得到光谱调制传递函数最小值为 $\text{sinc}(1/2)$ ，由此同样可以得出 (7) 式。

3.1.2. 采样曝光时间对光谱传递函数的影响

设干涉图采样间隔为 d ，采样曝光时间与采样间隔之比为 k ($k \leq 1$)，则干涉信号强度为

$$I(x) = B(\nu) \int_x^{x+dk} \exp(-i2\pi\nu x) dx, \quad (8)$$

简化后得到

$$I(x) = B(\nu) \text{sinc}(\nu dk) \exp(-i2\pi\nu x). \quad (9)$$

此时，光谱调制传递函数和光谱相位传递函数分别为

$$F_{\text{SMT}}(\nu) = \text{sinc}(\nu dk), \quad (10a)$$

$$F_{\text{SPT}}(\nu) = -2\pi\nu x. \quad (10b)$$

当 $k = 0$ 时，光谱调制传递函数的值为 1，为 δ 函数采样的理想情况。

由采样定理可知，干涉图采样间隔 $d \leq 1/2\nu$ ，当 $k = 1$ 时，表示采样曝光时间等于采样间隔，光谱调制传递函数的最小值为 $\text{sinc}(1/2)$ 。

由于时间调制 FT 光谱成像仪在采集干涉图时可能会有误差，比如采样步距误差、视场角对光程差

的影响等，也会导致光谱传递函数的变化。

3.2. 空间调制 FT 光谱成像仪的光谱传递函数

图 2 所示为空间调制 FT 光谱成像仪的基本原理^[16]。系统由前置镜、入射狭缝、横向剪切干涉仪、傅氏镜、柱面镜、探测器等部分组成，其中横向剪切干涉仪将入射狭缝垂直光轴剪切为两个相干的虚狭缝，经傅氏镜、柱面镜成像在探测器上，干涉条纹为平行于狭缝方向的直线。

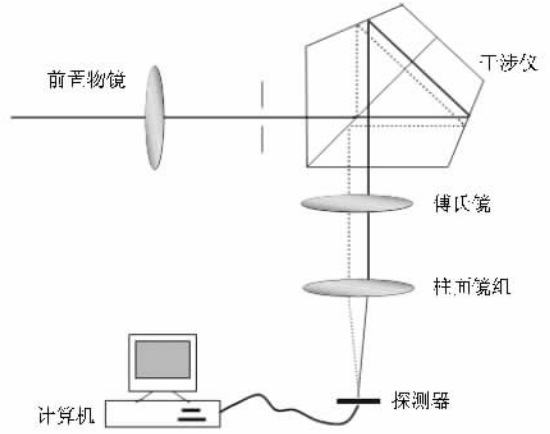


图 2 空间调制 FT 光谱成像仪原理示意图

根据不同的横向剪切干涉仪，空间调制 FT 光谱成像仪可以分为多种类型，有 Sagnac 型、Fresnel 型、Lloyd 型、Michelson 型、M-Z 型、偏振双折射型等。不同干涉仪决定了不同的仪器性质，也有不同的光谱传递函数。下面重点研究 Sagnac 型、Fresnel 型和 Lloyd 型三种分光方法的光谱传递函数。

3.2.1. Sagnac 型

采用 Sagnac 横向剪切干涉仪分光的空间调制 FT 光谱成像仪^[17]，其等效光路如图 3 所示。从图 3 可以看到，傅氏镜前焦面上有两个被横切干涉仪剪切形成的虚狭缝（宽度为 w ），其箭头方向表示了虚狭缝的宽度方向。

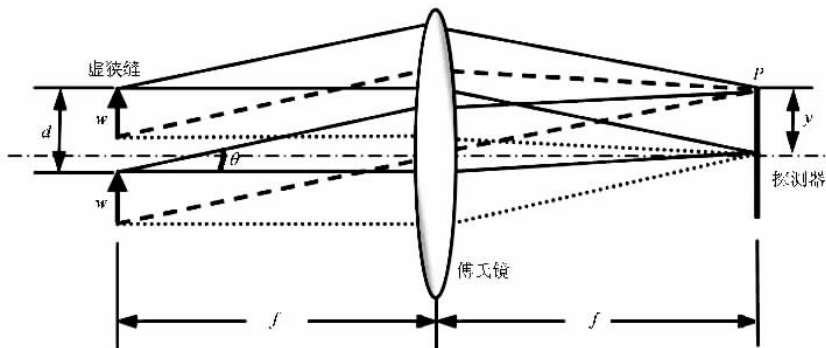


图 3 Sagnac 型空间调制 FT 光谱成像仪等效光路图

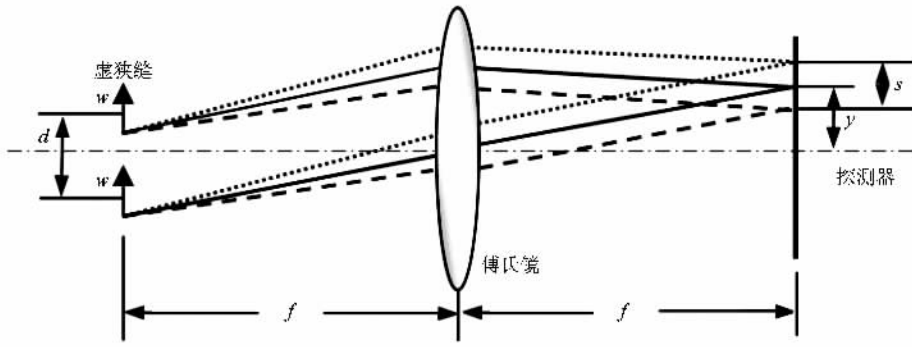


图 4 探测器像元大小对空间调制干涉信号的影响

探测器上任意点 P 处的光程差为

$$x = d \sin \theta = dy/f, \quad (11)$$

其中 d 为横向剪切量, f 是傅氏镜焦距, y 是 P 点距零光程差的距离. 考虑单色光入射时, 干涉信号强度与入射光谱强度分布间的关系为

$$I(x) = B(\nu) \exp(-i2\pi\nu x). \quad (12)$$

因此, 光谱调制传递函数与光谱位相传递函数分别为

$$F_{\text{SMT}}(\nu) = 1, \quad (13a)$$

$$F_{\text{SPT}}(\nu) = -2\pi\nu x. \quad (13b)$$

由于探测器像元具有一定大小, 会对干涉图产生影响. 等效光路见图 4. 设探测器填充因子为 100%, 像元尺寸 s , 则每个像元收集到的干涉强度为^[18]

$$I(x) = \int_{x_1}^{x_2} B(\nu) \exp(-i2\pi\nu x) dx, \quad (14)$$

其中

$$x_1 = dy_1/f,$$

$$x_2 = dy_2/f.$$

代入(14)式得到

$$I(x) = B(\nu) \text{sinc}(ds\nu/f) \exp(-i2\pi\nu x). \quad (15)$$

因此, 光谱调制传递函数与光谱位相传递函数分别为

$$F_{\text{SMT}}(\nu) = \text{sinc}(ds\nu/f), \quad (16a)$$

$$F_{\text{SPT}}(\nu) = -2\pi\nu x. \quad (16b)$$

(16a)式中, ds/f 代表了干涉信号的采样间隔, 根据采样定理, 需满足 $ds/f \leq 1/2\nu$, 代入(16a)式中得到光谱调制传递函数的最小值为 $\text{sinc}(1/2)$.

3.2.2. Lloyd 型

图 5 是基于 Lloyd 镜分光的空间调制 FT 光谱成像仪原理示意图^[19], 其等效光路图如图 6 所示.

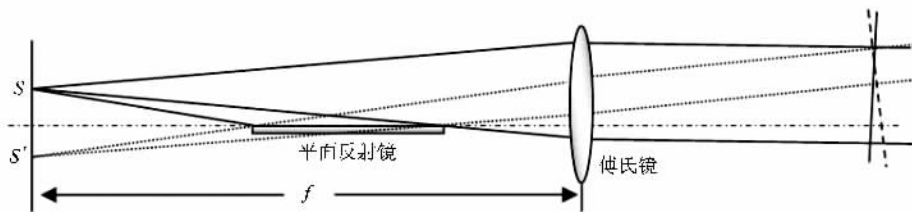


图 5 Lloyd 型空间调制 FT 光谱成像仪原理示意图

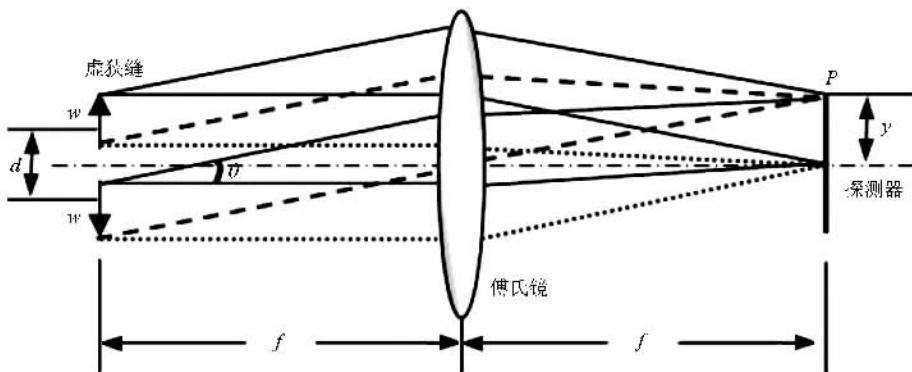


图 6 Lloyd 镜分光等效光路图

图 6 与图 4 的不同之处是虚狭缝的“方向”发生了变化,即成为一对关于光轴的镜像.设狭缝宽度为 w ,则狭缝中任意一对相干点的垂轴距离不等,故在 P 点处的光程差也不同,

$$\begin{aligned} x_{\xi} &= (d + 2\xi)\sin\theta \\ &= dy/f + 2\xi y/f. \end{aligned} \quad (17)$$

式中 ξ 为狭缝中任意一点距中心点的距离, $\xi \in [-w/2, w/2]$, d 是狭缝中心点的横向剪切量. (17) 式可以理解为狭缝中不同点的光程差由理想光程差 dy/f 和附加光程差 $2\xi y/f$ 组成. 可以得到 P 点处的干涉信号强度为

$$K(x) = B(\nu)\text{sinc}(2\nu wy/f) \exp(-i2\pi\nu x). \quad (18)$$

因此,光谱调制传递函数与光谱相位传递函数分别为

$$F_{\text{SMT}}(\nu) = \text{sinc}(2\nu wy/f), \quad (19a)$$

$$F_{\text{SPT}}(\nu) = -2\pi\nu x. \quad (19b)$$

由以上所述可知,对于 Lloyd 型空间调制 FT 光谱成像仪,零光程差处 ($y = 0$) 的干涉调制度为 1;距零光程差位置距离越远,光谱调制传递函数值越小;除零光程差点外,在同一探测器位置,入射狭缝越宽,光

谱调制传递函数值越小.

(19a) 式中, wy/f 是探测器同一位置处附加光程差的最大值.参考上述分析,当光谱调制传递函数的最小值为 $\text{sinc}(1/2)$ 时,得到附加光程差应小于 $\lambda/4$.

对于光谱分辨率 $R = \nu/\delta\nu$,光程差 $x \leq 1/2\delta\nu$, (19a) 式可改写为

$$F_{\text{SMT}}(\nu) \geq \text{sinc}(Rw/d). \quad (20)$$

当满足光谱调制传递函数的值不小于 $\text{sinc}(1/2)$ 时,

$$w \leq d/2R. \quad (21)$$

(21) 式限制了入射狭缝的宽度,同时也说明入射狭缝宽度与光谱分辨率成反比.

与 Sagnac 型空间调制 FT 光谱成像仪相同,探测器像元尺寸对光谱调制传递函数产生同样的影响.因此,对于 Lloyd 型空间调制 FT 光谱成像仪,光谱调制传递函数是两个环节共同作用的结果,即

$$F_{\text{SMT}}(\nu) = \text{sinc}(2\nu wy/f) \text{sinc}(d\nu/f). \quad (22)$$

3.2.3. Fresnel 型

基于 Fresnel 双面镜分光的空间调制 FT 光谱成像仪原理如图 7 所示^[19],其等效光路图如图 8 所示.

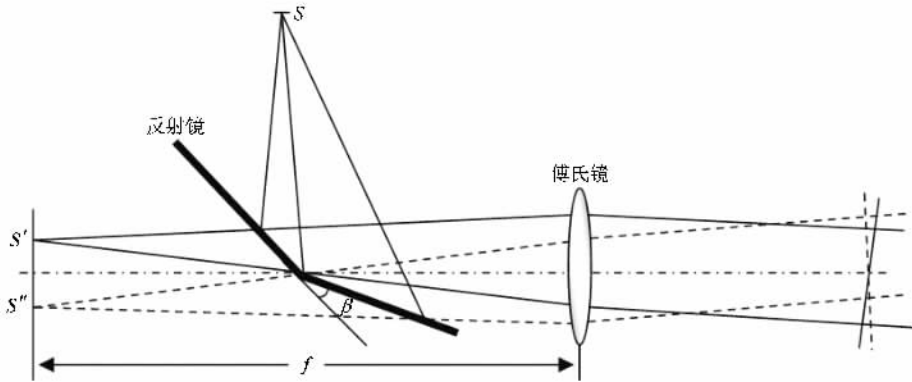


图 7 Fresnel 型空间调制 FT 光谱成像仪原理示意图

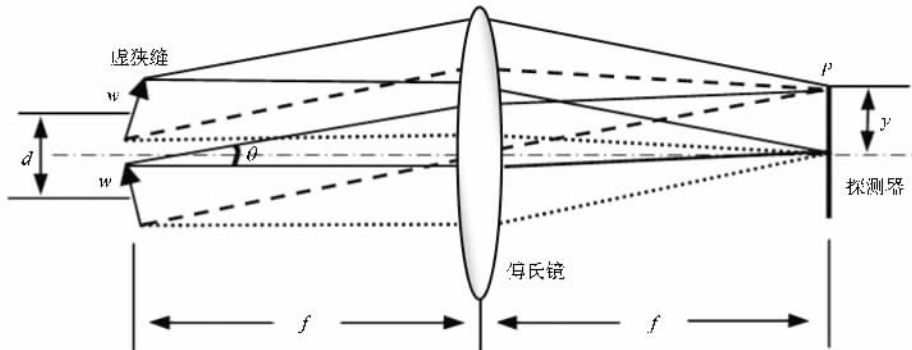


图 8 Fresnel 型空间调制 FT 光谱成像仪等效光路图

由图 7、图 8 可见横向剪切后的虚狭缝“方向”发生了变化,即一个虚像的箭头方向顺时针转动了 β 角,另一虚像的箭头方向逆时针转动了 β 角.

狭缝中任意点的光程差为

$$x = d \sin \theta + 2\xi \sin \beta \cos \theta, \quad (23)$$

式中 ξ 是狭缝中任意点距中心点的距离, $\xi \in [-w/2, w/2]$, w 为狭缝宽度. 得到探测器 P 点处的干涉信号强度为^[20]

$$I(x) = B(\nu) \text{sinc}(2\nu w \sin \beta \cos \theta) \exp(-i2\pi\nu x). \quad (24)$$

因此,光谱调制传递函数与光谱位相传递函数分别为

$$F_{\text{SMT}}(\nu) = \text{sinc}(2\nu w \sin \beta \cos \theta), \quad (25a)$$

$$F_{\text{SPT}}(\nu) = -2\pi\nu x. \quad (25b)$$

(25a) 式中,当光谱调制传递函数最小值 $\text{sinc}(1/2)$ 时,附加光程差 $w \sin \beta \cos \theta < \lambda/4$.

光谱调制传递函数与入射狭缝宽度和反射镜倾角 β (一般 β 角很小) 成反比,当 $\theta = 0$ 时,得到

$$w \leq \lambda / (4 \sin \beta). \quad (26)$$

探测器像元尺寸对 Fresnel 型空间调制 FT 光谱成像仪光谱传递函数的影响与上述相同. 因此,光谱调制传递函数也是两个环节共同决定的,即

$$F_{\text{SMT}}(\nu) = \text{sinc}(2\nu w \sin \beta \cos \theta) \text{sinc}(d\nu/f). \quad (27)$$

4. 结 论

本文定义了光谱成像仪的光谱传递函数,并针对几种常见的 FT 光谱成像仪推导了相应的光谱调制传递函数和光谱相位传递函数. 发现采用不同分光方法的光谱成像仪,光谱传递函数也存在差异. 在时间调制 FT 光谱成像仪中,探测器像元尺寸会引起光谱传递函数变化,光谱相位和调制传递函数制约了最大光谱分辨率. 通过对两种制约因素的分析得到了相同的结论. 在空间调制 FT 光谱成像仪中, Sagnac 干涉仪的光谱调制传递函数值为 1,表明采用这种干涉仪分光时,入射狭缝的宽度和形状不影响干涉信号的调制度,也不影响复原光谱的分辨率. 这是它的一个普遍认可的优点. 其他类型的干涉仪都会造成光谱调制传递函数的降低,从而对入射狭缝宽度等参数提出了限制要求. 光谱传递函数不但反映出各类光谱成像仪的本质特点,为我们选择方案提供了科学和客观的判据,也可作为光谱成像仪在光谱域的一个综合性能评价指标来指导仪器的研制工作.

- [1] Schaepman M E, Itten K I, Schläpfer D, et al. 2004 *Proc. SPIE* **5234** 202
- [2] Basedow R, Carner D 1995 *Proc. SPIE* **2480** 258
- [3] Porter W M, Enmark H T 1987 *Proc. SPIE* **834** 101
- [4] Folkman M A, Pearlman J, Liao L B, Jarecke P J 2001 *Proc. SPIE* **4151** 40
- [5] Wilson T L, Davis C O 2001 *Proc. SPIE* **3437** 101
- [6] Barnes W L, Xiong X X, Salomonson V V 2004 *Proc. SPIE* **5542** 14
- [7] Baudin G, Bessudo R, Bezy J L 1994 *Proc. SPIE* **2209** 115
- [8] Cutter M A 2004 *Proc. SPIE* **5546** 126
- [9] Stobie J A, Hairston A W, Tobin S P, Huppi R J, Huppi R 2002 *Proc. SPIE* **4818** 213
- [10] Otten L J, Sellar R G, Rafert J B 1995 *Proc. SPIE* **2583** 566
- [11] Xiangli B 1997 *Post-Doctoral Final Technical Report* (Xi'an: Xi'an Institute of Optical and Precision Mechanics, Chinese Academy of

Sciences)(in Chinese)[相里斌 1997 博士后研究报告(西安:中国科学院西安光学精密机械研究所)]

- [12] Horton R F, Conger C A, Pellegrino L S 1997 *Proc. SPIE* **3118** 380
- [13] Stewart J E 1965 *Appl. Opt.* **4** 609
- [14] Katzberg S J, Statham R B 1996 *NASA Technical Paper*(Houston: NASA)3570
- [15] Bell R J 1972 *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* (New York: Academic Press) p 145
- [16] Rafert J B, Sellar R G, Blatt J H 1995 *Appl. Opt.* **34** 7228
- [17] Lucey P G, Horton K, Rafert J B 1993 *Proc. SPIE* **1937** 130
- [18] Xiangli B, Zhao B C, Xue M Q 1998 *Acta Opt. Sin.* **18** 16 (in Chinese)[相里斌、赵葆常、薛鸣球 1998 光学学报 **18** 16]
- [19] Born M, Wolf E 1999 *Principles of Optics* (7th ed. (London: Cambridge University Press)) p245,
- [20] Xiangli B, Gao Z, An B Q 1998 *Proc. SPIE* **3502** 30

Spectral transfer function of the Fourier transform spectral imager^{*}

Xiangli Bin^{1)†} Yuan Yan²⁾ Lü Qun-Bo¹⁾

¹⁾ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

²⁾ School of Instrument Science and Opto-electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(Received 22 January 2008; revised manuscript received 12 December 2008)

Abstract

The spectral transfer function of the imaging spectrometer is defined on the basis of the linear system theorem. The spectral transfer functions including spectral modulation transfer functions and the spectral phase transfer functions of the temporally modulated Fourier transform spectral imager based on Michelson interferometer and those of the spatially modulated Fourier transform spectral imagers based on Sagnac interferometer, Fresnel interferometer, and Lloyd interferometer are deduced. These spectral transfer functions could be regarded as an objective criteria in the spectral domain of spectral imagers. Together with the well known optical transfer function, the performance of the imaging spectrometer could be described comprehensively.

Keywords : Fourier transform, spectral imager, spectral transfer function

PACC : 4230L, 4230K, 0765

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60678038).

[†] E-mail: xiangli@opt.cn